

Quelle: eigene Darstellung

# SYSTEMISCHES KASKADENPOTENZIAL VON KRITIS-TEILSEKTOREN

Kritische Infrastrukturen (KRITIS) sind die Hauptschlagadern moderner Gesellschaften. Sie liefern Strom und Wasser, ermöglichen den Transport von Gütern und Informationen und sorgen in ihrem Zusammenwirken für ein funktionierendes Gemeinwesen. Dieser Beitrag stellt einen ersten Ansatz vor, wie sich die Komplexität des Gesamtsystems greifbar machen lässt, nämlich durch die Operationalisierung des „systemischen Kaskadenpotenzials“.

---

**Hanna Christine Schmitt**

ist Raumplanerin und wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Raumplanung (IRPUD) der TU Dortmund. Sie promoviert zum Umgang mit systemischen Kaskadeneffekten aus kritischen Infrastrukturen. Ihre weiteren Forschungsinteressen liegen in der Risiko- und Klimafolgenforschung, wo sie sich insbesondere mit Risikomanagement in der Raumplanung, der Anpassung an Extremwetterereignisse und komplexen Systemen befasst.  
hanna.schmitt@tu-dortmund.de

## KRITIS: Ein komplexes System

Jede kritische Infrastruktur ist in sich bereits schwer zu erfassen. Die physischen Infrastrukturanlagen bestehen aus diversen Bestandteilen, die wiederum durch unterschiedliche Prozesse kritische (Versorgungs-)Dienstleistungen für Bevölkerung oder Wirtschaft erbringen (vgl. BBK 2017: 16; Fekete 2018: 22).

Wahrlich komplex werden KRITIS jedoch erst durch ihre Vernetzung untereinander (vgl. Bouchon 2006: 16; Dudenhofer/Permann/Manic 2006: 479; Katina/Keating 2015: 318), also durch die Abhängigkeit einer kritischen Infrastruktur von der Versorgungsleistung einer anderen. Die Informationstechnik lässt sich beispielsweise undenkbar ohne Elektrizität betreiben und die Ernährungswirtschaft ist in hohem Maße auf die Versorgung mit Wasser angewiesen. Die tiefergehenden systemischen Beziehungen, „[...] die über das Einzelne hinausgehen“ (Vester 2015: 16), werden aufgrund ihrer Unsichtbarkeit und Vielschichtigkeit bisher jedoch eher selten thematisiert (vgl. Katina et al. 2014: 23).

Aufgrund der Vernetzung und ihres funktionellen Zusammenwirkens werden KRITIS als komplexes System, beziehungsweise als System-von-Systemen (engl. „system-of-systems“) charakterisiert (vgl. Eusgeld/Nan/Dietz 2011: 681). Komplexe Systeme zeichnen sich dadurch aus, dass ihre Subsysteme „[...] in einer bestimmten dynamischen Ordnung zueinander stehen, zu einem Wirkungsgefüge vernetzt sind. In dieses kann man nicht eingreifen, ohne dass sich die Beziehung aller Teile zueinander und damit der Gesamtcharakter des Systems ändern würde“ (Vester 2015: 25).

Besonders relevant wird die systemische Vernetzung von KRITIS, wenn es zu einer Beeinträchtigung oder sogar einem Funktionsausfall eines Subsystems kommt. Eine kaskadenartige Ausbreitung über die Abhängigkeiten (Dependenzen) der Subsysteme untereinander und damit einhergehend eine vervielfachte Beeinträchtigung werden dann wahrscheinlich. Dieses Phänomen, auch als Kaskadeneffekt bezeichnet, verdeutlicht die dringende Notwendigkeit einer systemischen Perspektive auf KRITIS (vgl. Di Mauro et al.

2010: 284; Katina/Hester 2013: 213; Laugé/Hernantes/Sarriegi 2015: 16; Rinaldi/Peerenboom/Kelly et al. 2001: 21).

In Deutschland ist bisher strategisch wie rechtlich ein Mangel einer systembezogenen Perspektive auf KRITIS festzustellen. Zwar liefert die KRITIS-Strategie (Nationale Strategie zum Schutz Kritischer Infrastrukturen) die Basis für eine Bund-Länder-abgestimmte Untergliederung des KRITIS-Systems in neun Sektoren und 29 Branchen (vgl. BSI/BBK 2019). Die Strategie selbst benennt aber die Abhängigkeiten zwischen diesen nur am Rande (vgl. BMI 2009: 5). Und obwohl die BSI-KritisV (Verordnung zur Bestimmung Kritischer Infrastrukturen nach dem BSI-Gesetz) Schwellenwerte zur Identifizierung national bedeutsamer kritischer Infrastrukturanlagen festlegt und deren Betreiber zur Umsetzung von Mindestsicherheitsstandards verpflichtet, geschieht dies mit einem ausschließlichen Anlagenbezug unter dem Aspekt der Sicherheit informationstechnischer Systeme.

Mittlerweile ist es seit über einem Jahrzehnt unter anderem auch Aufgabe der Raumordnung, dem „Schutz kritischer Infrastrukturen [...] Rechnung zu tragen“ (§ 2 Abs. 2 Nr. 3 Satz 4 ROG). Jedoch ist festzustellen, dass es noch immer an einer Überführung des Grundsatzes in die raumordnerische Praxis mangelt, was sicherlich der Komplexität und Abstraktheit des Auftrages zuzuschreiben ist, aber auch an fehlenden Operationalisierungs- und Handlungsansätzen liegt. Entsprechend vermag auch der Raumordnungsgrundsatz aufgrund seiner definitorischen wie inhaltlichen Uneindeutigkeit derzeit weder in einer anlagen- noch in einer systembezogenen Perspektive zu helfen.

Ziel dieser Forschung – die im Rahmen einer Dissertation am Institut für Raumplanung (IRPUD) der Technischen Universität Dortmund erfolgt – ist es daher, einen Weg hin zu einer systemischen Perspektive auf KRITIS in Deutschland aufzuzeigen. Hierzu wird ein komplexitätsreduzierter, generisch-abstrakter Forschungsansatz entwickelt, der eine Untersuchung der Ausbreitungspfade und -stärke von potenziellen Kaskadeneffekten im KRITIS-Gesamtsystem vornimmt.

# Systemisches Kaskadenpotenzial: Schlüssel zum komplexen System KRITIS

Wie alle komplexen Systeme, ist das KRITIS-Gesamtsystem ein dynamisches Wirkungsgefüge, in dem sich die einzelnen Subsysteme aufgrund ihrer Vernetzung untereinander prägen und teilweise gegenseitig bedingen. Die Vernetzung ermöglicht jedoch auch, dass sich Kaskadeneffekte durch das System ausbreiten und negativ auf Subsysteme einwirken, die in keinem direkten Zusammenhang mit der initialen Beeinträchtigung stehen.

Um das Zusammenwirken der vernetzten Subsysteme besser erfassen und gegebenenfalls Schutzbemühungen priorisieren zu können, muss das KRITIS-Gesamtsystem auf zwei Ebenen untersucht werden: Einerseits mit Fokus auf die Subsysteme und ihre Vernetzungen, damit die grundsätzliche Möglichkeit zur Ausbreitung von Kaskadeneffekten ermittelt werden kann. Andererseits mit Fokus auf die Abhängigkeiten (Dependenzen) zwischen den Subsystemen, damit sich die Stärke abschätzen lässt, mit der ein potenzieller Kaskadeneffekt weitergegeben wird.

Unter dieser Maßgabe zielt der hier vorgestellte Forschungsansatz des „systemischen Kaskadenpotenzials“ darauf, die Möglichkeit der Weitergabe von Kaskadeneffekten sowie deren etwaige Stärke abzuschätzen, was im Weiteren als „Kaskadenpotenzial“ bezeichnet wird. Der Zusatz „systemisch“ fokussiert das zu untersuchende Kaskadenpotenzial auf funktionelle, sprich systembezogene (und nicht auf räumliche) Kaskadeneffekte. Im Ergebnis führt die Ermittlung des systemischen Kaskadenpotenzials nicht nur zu einem tiefergehenden Systemverständnis, sondern eröffnet die Möglichkeit, Subsysteme quantitativ miteinander zu vergleichen.

Dabei werden die zu untersuchenden Subsysteme des KRITIS-Gesamtsystems in Deutschland im Folgenden als Teilspektoren bezeichnet. Der Begriff ist der Schweizer KRITIS-Strategie (SKI-Strategie) entliehen und meint die Unterebene der neun KRITIS-Sektoren, die da sind: Energie, Ernährung, Finanz- und Versicherungswesen, Gesundheit, Informationstechnik und Telekommunikation, Medien und Kultur, Staat und Verwaltung, Transport und Verkehr sowie Wasser (vgl. BSI/BBK 2019). Die Teilspektorbearbeitungen entsprechen dabei denen der 29 Branchen (siehe auch Abb. 8), werden inhaltlich jedoch über den durch die BSI-KritisV geprägten informationstechnischen Fokus hinaus verstanden.

## Das systemische Kaskadenpotenzial operationalisieren

Zur Erfassung des systemischen Kaskadenpotenzials ist es also erforderlich, gleichermaßen auf die Teilspektoren wie auf die Abhängigkeiten zu fokussieren. Hierzu werden folgende Annahme formuliert:

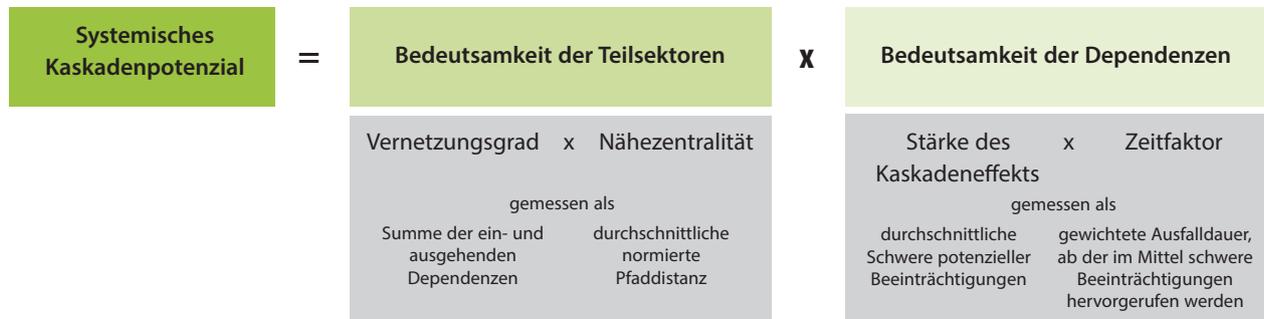
- Je stärker und je enger ein Teilspektor im KRITIS-Gesamtsystem vernetzt ist, desto bedeutsamer ist er für dieses.
- Je schneller und je stärker ein potenzieller Kaskadeneffekt in einem anderen Teilspektor wirkt, desto bedeutsamer ist die Abhängigkeit zwischen den beiden Teilspektoren.

Zur Operationalisierung des systemischen Kaskadenpotenzials bedarf es entsprechend der ersten Annahme eines Faktors 1, der die Summe der ein- und ausgehenden Abhängigkeiten eines jeden Teilspektors misst und damit bestimmt, wie hoch sein Vernetzungsgrad (engl. „degree“) ist. Zudem ermittelt der Faktor, wie engmaschig der Teilspektor mit allen anderen Teilspektoren vernetzt ist, also über wie viele Teilspektoren ein Kaskadeneffekt durchschnittlich laufen muss, um alle Teilspektoren zu erreichen, was auch als Pfaddistanz bezeichnet wird. Die durchschnittliche Pfaddistanz misst wiederum die Nähezentralität (engl. „closeness centrality“) eines Teilspektors, die sich dann mit dem Vernetzungsgrad zusammenführen lässt. Dieser Faktor 1 wird im Weiteren als **Bedeutsamkeit der Teilspektoren** bezeichnet.

Entsprechend der zweiten Annahme bedarf es eines Faktors 2. Dieser misst zum einen, mit welcher potenziellen Stärke ein Kaskadeneffekt weitergegeben wird, schätzt also die potenzielle Schwere ab, mit der eine aus einem Teilspektor ausgehende Beeinträchtigung in einem anderen Teilspektor wirkt. Zum anderen ermittelt der Faktor, ab welcher Ausfalldauer eines Teilspektors im Durchschnitt starke oder volle Beeinträchtigungen der anderen Teilspektoren zu erwarten sind, um die Stärke des potenziellen Kaskadeneffekts mit einem Zeitfaktor gewichten zu können. Dieser Faktor 2 wird im Weiteren als **Bedeutsamkeit der Abhängigkeiten** bezeichnet.

Abbildung 1 veranschaulicht die beiden Faktoren zur Operationalisierung des Kaskadenpotenzials und deren Berechnungsvorschrift.

## Faktoren zur Operationalisierung des systemischen Kaskadenpotenzials



Quelle: eigene Darstellung

## Befragung von Expertinnen und Experten

Um die Berechnungsvorschrift zur Operationalisierung des systemischen Kaskadenpotenzials zu erfüllen, werden verschiedene Tools und Methoden angewendet. Wenngleich letztlich auf eine quantitative Vergleichbarkeit der Teilsektoren hinsichtlich ihres systemischen Kaskadenpotenzials gezielt wird, braucht es für ein tiefergehendes Systemverständnis zunächst eine grafische Aufbereitung und Interpretation des Gesamtnetzwerks. Die Datenbasis für die Operationalisierung bildet eine onlinegestützte Befragung von Expertinnen und Experten.

Diese Befragung erfolgte unter dem Titel „Abhängigkeiten zwischen KRITIS-Teilsektoren“ über das Portal SoSci Survey und wurde im Frühjahr 2019 durchgeführt. Als Expertinnen und Experten wurden Personen kontaktiert, die für ihren jeweiligen Teilsektor einen inhaltlich möglichst umfassenden, räumlich wie politisch unabhängigen Überblick besitzen und im Idealfall über ihre Anbindung an eine entsprechende Einrichtung rahmende Mitgestalterinnen und -gestalter im Umgang mit KRITIS in Deutschland sind. Als Mindestumfang der Befragung wurden drei vollständige Rückmeldungen von Expertinnen und Experten eines jeden der 29 Teilsektoren ( $n_{\text{Teilsektor}} \geq 3$ ;  $n_{\text{gesamt}} \geq 87$ ) festgelegt, damit sich diese anonymisiert und zu gemittelten Aussagen zusammenfassen lassen.

Der Befragung liegt ein fiktives Setting zugrunde, das einerseits komplexitätsreduzierend wirkt und andererseits die Generierung von allzu sensiblen Daten verhindert. Dieses Umfragesetting enthält folgende Annahmen: Bei einem Ausfall sind jeweils alle Infrastrukturen eines Teilsektors betroffen – zum Beispiel des Teilsektors Elektrizität. Der Ausfall findet im gesamten Bundesgebiet zugleich statt (Totalausfall). Der Ausfall geschieht plötzlich und erlaubt keine kurzfristige Vor-

bereitung. Während der gesamten Ausfalldauer finden keine erfolgreichen Wiederherstellungsversuche statt. Bestehende Back-up-Systeme (z. B. Notstromgeneratoren) werden jedoch so lange wie verfügbar genutzt. Deutschland kann während des Ausfalls keine Hilfe aus dem Ausland beziehen. Der Grund für den Ausfall ist unbekannt beziehungsweise irrelevant.

Abbildung 2 veranschaulicht die Fragen, die alle Expertinnen und Experten unter Maßgabe des fiktiven Settings für ihren jeweiligen Teilsektor beantworten mussten. Dabei dienen Fragen 1 und 2 der Operationalisierung von Faktor 1 des systemischen Kaskadenpotenzials, indem die ein- und ausgehenden Abhängigkeiten eines jeden Teilsektors über eine erweiterte Mehrfachauswahl erfasst werden. Frage 3 zielt auf die Operationalisierung von Faktor 2, indem für unterschiedliche Ausfalldauern die Stärke der potenziellen Beeinträchtigung auf einer prozentualen Skala aufgetragen wird.

Die anschließende Verwertung und Aufbereitung der Befragungsdaten erfolgt über Gephi, eine kostenlose Open-Source-Software zur Netzwerkvisualisierung und -analyse. Gephi ermöglicht es, die KRITIS-Teilsektoren als Knoten (Kreise) und ihre Abhängigkeiten als Kanten (Linien) unter Auswahl eines bestimmten Layouts als Gesamtsystem ohne Raumbezug darzustellen.

Das hier gewählte Layout ForceAtlas2 nimmt die Netzwerkgestaltung über einen kräftebasierten Algorithmus vor. Es ahmt physikalische Kräfte nach, indem simuliert wird, dass sich alle Knoten gleichermaßen voneinander abstoßen, ähnlich wie elektrisch geladene Partikel ( $F_r = k/d^2$ ). Gleichzeitig weist jede Kante eine bestimmte mechanische Anziehungskraft auf, die ähnlich der einer Feder ( $F_a = -k \cdot d$ ) wirkt (vgl. Jacomy et al. 2014: 2). Ein Netzwerk richtet sich daher im Equilibrium so aus, dass sich die Kräfte möglichst ausglei-

Bedeutsamkeit der Teilspektoren	Bedeutsamkeit der Abhängigkeiten
<p>Vernetzungsgrad x Nähezentralität</p> <p style="text-align: center;">gemessen als</p> <p>Summe der ein- und ausgehenden Abhängigkeiten x durchschnittliche normierte Pfaddistanz</p>	<p>Stärke des Kaskadeneffekts x Zeitfaktor</p> <p style="text-align: center;">gemessen als</p> <p>durchschnittliche Schwere potenzieller Beeinträchtigungen x gewichtete Ausfalldauer, ab der im Mittel schwere Beeinträchtigungen hervorgerufen werden</p>
Frage 1a: Wenn Ihr Teilsektor NAME für zwei Wochen ausfiele, welche anderen KRITIS-Teilspektoren wären davon potenziell <b>direkt (unmittelbar)</b> in ihrer Funktionsfähigkeit beeinträchtigt?	Frage 3: Wie stark ist Ihr Teilsektor NAME beeinträchtigt, wenn der Teilsektor NAME für folgende Dauern ausfällt?
Frage 1b: Wenn Ihr Teilsektor NAME für zwei Wochen ausfiele, welche anderen KRITIS-Teilspektoren wären davon potenziell <b>indirekt (mittelbar)</b> in ihrer Funktionsfähigkeit beeinträchtigt?	
Frage 2: Auf welche anderen KRITIS-Teilspektoren ist Ihr Teilsektor NAME <b>direkt (unmittelbar)</b> zum Funktionieren angewiesen?	

Quelle: eigene Darstellung

chen, also indem alle Knoten gleichweit voneinander entfernt angeordnet werden und dieselbe Kantenlänge (Federkraft) aufweisen. Je nachdem, welche Knoten im Datensatz über eine Kante miteinander verbunden sind und je nachdem, wie viele Kanten diese Knoten verbinden, reorganisiert sich das Netzwerk. Ein Knoten, der Kanten zu allen anderen Knoten aufweist, wird entsprechend an zentraler Stelle im Netzwerk positioniert, von wo aus die Kantenlängen möglichst gering sind. Ein Knoten, der nur über wenige Kanten

mit anderen Knoten verbunden ist, wird tendenziell an den Rand des Netzwerks gedrängt, wo die elektrostatische Kraft die mechanische überwiegt. Als zusätzliche Einstellung ist für alle Visualisierungen der LinLog-Modus aktiviert, der aufgrund von linearer Anziehungs- und logarithmischer (statt ebenfalls linearer) Abstoßungskraft das Netzwerk verdichtet. Die Option „Überlappung verhindern“ sorgt dafür, dass sich die Kanten möglichst wenig überlagern, was die Lesbarkeit des Netzwerkes erhöht.

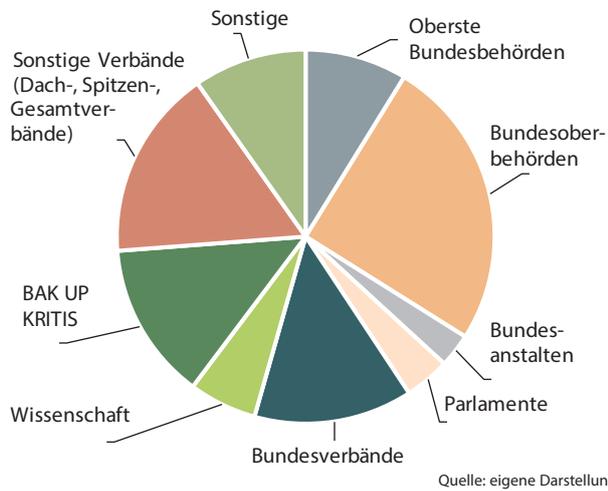
## Das systemische Kaskadenpotenzial berechnen

Die Umfrage führte zu 103 vollständigen Rückmeldungen. Diese lassen sich nach neun Gruppen klassifizieren (siehe Abb. 3). Am stärksten vertreten sind Expertinnen und Experten aus Bundesoberbehörden, da diese prioritär angefragt wurden. Gemeinsam mit Expertinnen und Experten aus obersten Bundesbehörden machen sie mehr als ein Drittel aller Rückmeldungen aus. Ähnlich stark vertreten sind Expertinnen und Experten aus Bundes- oder sonstigen,

deutschlandweit agierenden Verbänden (knapp 30 Prozent aller Rückmeldungen). Jeweils etwa zehn Prozent der Rückmeldungen entfallen auf die Branchenarbeitskreise des UP KRITIS und die Sammelgruppe „sonstigen Einrichtungen“, zu denen unter anderem Behörden im Geschäftsbereich von Bundesministerien, Bundesmittelbehörden, Unternehmen im Eigentum der Bundesrepublik Deutschland und Nationale Gremien (Stiftungen, Ausschüsse, Komitees) zählen. Einige

3

### Vollständige Umfragerückmeldungen nach Gruppen



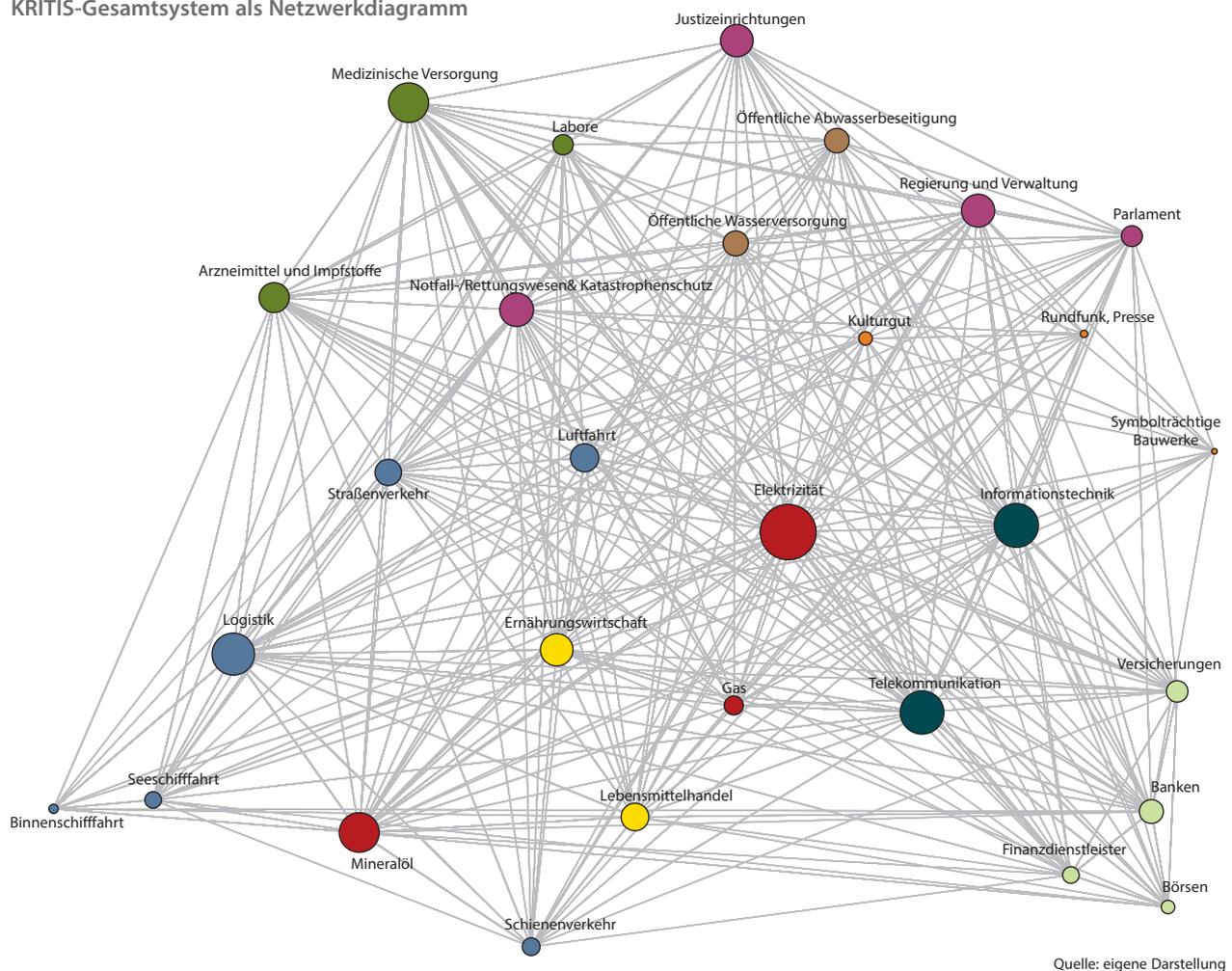
wenige Expertinnen und Experten kommen aus Bundesan-  
stalten, Parlamenten und der Wissenschaft.

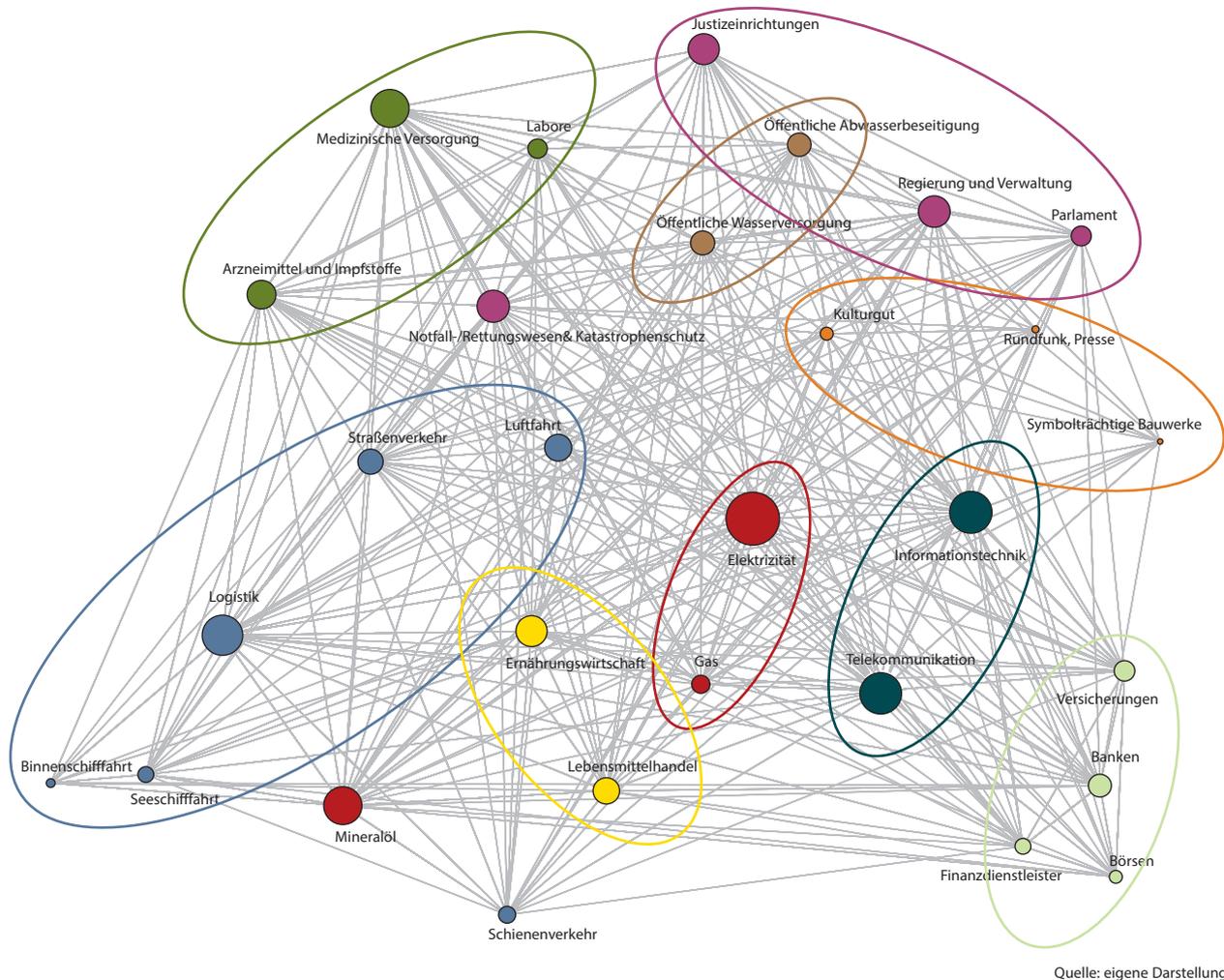
### Faktor 1 – Bedeutsamkeit der KRITIS- Teilspektoren

Zunächst wird die Bedeutsamkeit der Teilspektoren unter-  
sucht, indem ihr Vernetzungsgrad und ihre Nähezentralität  
bestimmt werden. Dabei wird die Nähezentralität auf das In-  
tervall [0, 1] normiert, um die durchschnittliche Pfaddistanz  
zu vereinheitlichen. Der Wert von 1 steht dabei für eine dire-  
kte Nachbarschaft zu allen anderen Teilspektoren. Mithilfe des  
Gephi-Layouts ForceAtlas2 wird das KRITIS-Gesamtsystem  
als Netzwerkdiagramm visualisiert, wie es in der Gesamtheit  
der Aussagen der Expertinnen und Experten beschrieben ist  
(siehe Abb. 4). Dabei ist jede ein- oder ausgehende Depen-  
denz als eigene Kante dargestellt, die in Summe über die

4

### KRITIS-Gesamtsystem als Netzwerkdiagramm





Knotenpositionierung entscheiden. Die Knotengröße visualisiert, unabhängig der Knotenposition und der dahinterliegenden simulierten Kräfteverhältnisse, ebenfalls die Summe der ein- und ausgehenden Abhängigkeiten. Es wird farblich nach den neun Sektoren der KRITIS-Strategie unterschieden.

Anhand der raumunabhängigen Netzwerkausgestaltung lässt sich jeder KRITIS-Teilsektor hinsichtlich seines Vernetzungsgrades und seiner Nähezentralität wie auch hinsichtlich seiner funktionellen Positionierung im Gesamtsystem ermitteln und interpretieren.

Der Teilsektor Elektrizität (rot) steht beispielsweise an zentraler Position im Gesamtnetzwerk. Daraus lässt sich schließen, dass besonders viele Expertinnen und Experten Dependen-

zen ihres eigenen Teilsektors von und zu diesem Teilsektor identifiziert haben. Zudem liegt die durchschnittliche, normierte Pfaddistanz für den Teilsektor Elektrizität bei 0,97. Das heißt, dass der Knoten zu fast allen anderen Knoten eine direkte Vernetzung aufweist. Der Teilsektor Elektrizität ist entsprechend sehr bedeutsam.

Ähnlich zentral stehen die Teilsektoren Luftfahrt (blau) und Ernährungswirtschaft (gelb). Hinsichtlich ihrer Knotengröße fallen diese verglichen mit dem Teilsektor Elektrizität jedoch deutlich kleiner aus, was Aufschluss über die insgesamt ein- und ausgehenden Abhängigkeiten gibt. Offensichtlich nehmen die Teilsektoren Luftfahrt und Ernährungswirtschaft also nicht ausschließlich aufgrund der Summe ihrer ein- und ausgehenden Abhängigkeiten eine zentrale Position ein,

sondern aufgrund ihrer Quell-Ziel-Beziehungen zu anderen (zentralen) Teilsektoren. Während die Ernährungswirtschaft eine durchschnittliche, normierte Pfaddistanz von 0,51 aufweist, hat die Luftfahrt mit einer Nähezentralität von 0,58 eine etwas niedrigere Pfaddistanz. Sie ist also enger vernetzt.

Ebenfalls markant ist die Positionierung des Teilsektors Symbolträchtige Bauwerke, der am äußersten rechten Rand des Gesamtnetzes platziert ist. Da dieser zugleich eine sehr geringe Knotengröße aufweist, besitzt er insgesamt wenige ein- und ausgehende Abhängigkeiten. Darüber hinaus ist er tendenziell mit Teilsektoren vernetzt, die ebenfalls an weniger zentraler Position im Netzwerk stehen. Dieser Umstand spiegelt sich auch in der Nähezentralität des Teilsektors wider: Diese liegt bei 0,31 und weist damit eine relativ hohe Pfaddistanz auf.

Des Weiteren zeigt die Netzwerkvisualisierung, welche Teilsektoren in direkter Nachbarschaft zueinander liegen, also tendenziell eng miteinander verbunden sind, und ob es sektorale Cluster gibt (siehe Abb. 5).

Fast alle Teilsektoren befinden sich in unmittelbarer Nachbarschaft zu anderen Teilsektoren ihres Sektors. Sie sind demnach so eng verbunden, dass sich bereits rein optisch sektorale Cluster abgrenzen lassen. Am deutlichsten zeigt sich die sektorale Clusterbildung an den Teilsektoren des Finanz- und Versicherungswesens (hellgrün). Die vier Knoten, die die Teilsektoren dieses Sektors visualisieren, befinden sich nicht nur alle am selben Rand des Netzwerks. Sie stehen darüber hinaus deutlich enger zusammen als die meisten anderen Knoten. Die Teilsektoren sind demnach durch viele Abhängigkeiten untereinander verknüpft und weisen ein relativ entferntes Verhältnis zu den anderen Teilsektoren auf. Diese Erkenntnis gilt am stärksten für den Teilsektor Börsen, der noch in zweiter Reihe hinter den Teilsektoren Banken und Finanzdienstleister angeordnet ist. Der vermeintlich stärkste Bezug der Teilsektoren des Finanz- und Versicherungswesens besteht zu den Teilsektoren von Informationstechnik und Telekommunikation. Sie sind – aus einer konzentrischen Lesart – unmittelbar vor den vier Teilsektoren des Finanz- und Versicherungswesens platziert.

Visuell nicht eindeutig zu Sektor-Clustern zuordnen lassen sich drei Teilsektoren, von denen der Auffälligste der Teilsektor Notfall-/Rettungswesen & Katastrophenschutz ist. Dieser gehört gemäß Brancheneinteilung zum Sektor Regierung und Verwaltung (vgl. BSI/BBK 2019). Im Netzwerk steht der Teilsektor jedoch in unmittelbarer Nachbarschaft zu den Teilsektoren des Sektors Gesundheit. Darüber hinaus ist er nah an den Teilsektoren des Sektors Wasser platziert und weist zu den Teilsektoren Straßenverkehr und Luftfahrt

engere Verbindungen auf als zu den Teilsektoren des eigenen Sektors. Rein dependenzbezogen argumentiert, ließe sich der Teilsektor Notfall-/Rettungswesen & Katastrophenschutz also hinsichtlich seiner Branchenzuordnung eher an den Sektor Gesundheit statt an Regierung und Verwaltung angliedern.

## Faktor 2 – Bedeutsamkeit der ausgehenden Abhängigkeiten

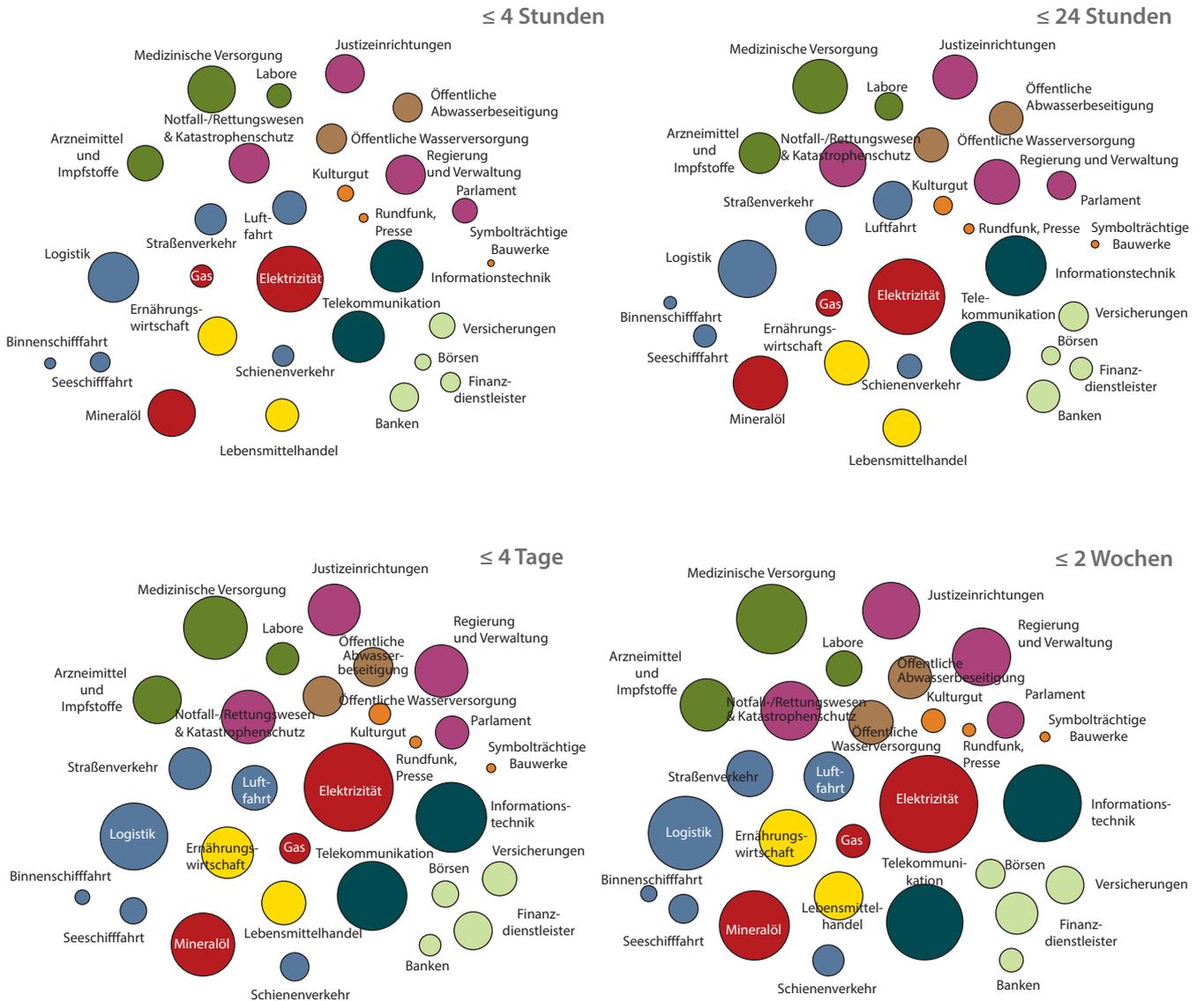
Neben den KRITIS-Teilsektoren steht auch die Bedeutsamkeit der Abhängigkeiten im Fokus. Diese wird durch das Ausmaß eines Kaskadeneffekts, also durch die Stärke und Schnelligkeit des Wirkens von Beeinträchtigungen bestimmt.

Die Netzwerkdiagramme in Abbildungen 6 und 7 visualisieren die Veränderungen im Gesamtsystem, die sich aufgrund von unterschiedlichen Ausfallzeiten des Quell-Teilsektors ergeben. Dabei ist wie in Abbildung 4 jede benannte ein- oder ausgehende Abhängigkeit als eigene Kante dargestellt. Anders als zuvor sind die Kanten in Abbildung 6 jedoch hinsichtlich der Schwere potenzieller Beeinträchtigungen im Ziel-Teilsektor gewichtet. Eine Kante mit schwereren potenziellen Beeinträchtigungen besitzt demnach ein höheres Kantengewicht und beeinflusst damit das Netzwerk durch eine größere simulierte Federkraft. Graustufen veranschaulichen die Kantengewichtung, wobei eine höhere Intensität eine stärkere potenzielle Beeinträchtigung bedeutet. In fünf Abstufungen wird demnach unterschieden zwischen Abhängigkeiten, die keine Beeinträchtigung weitergeben (weißgrau), bis hin zu Abhängigkeiten, über die es zu einer vollen Beeinträchtigung des Ziel-Teilsektors kommt (anthrazit).

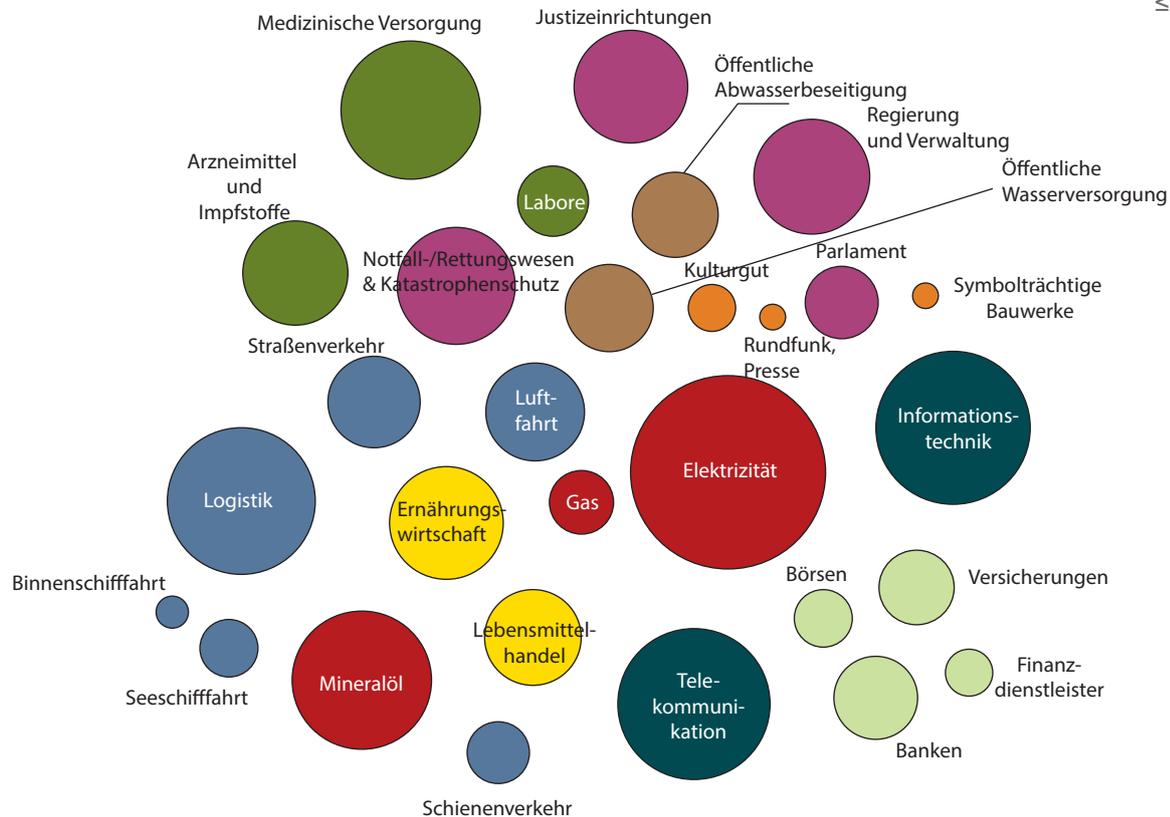
Die Abbildungen 6 und 7 veranschaulichen die Veränderung, die das KRITIS-Gesamtsystem vollzieht, wenn die Bedeutsamkeit der Abhängigkeiten in die Visualisierung einbezogen wird. Während bei einer Ausfalldauer von maximal 24 Stunden nur wenige Verbindungen eine starke oder volle Beeinträchtigung an den Ziel-Teilsektor weitergeben, gilt dies bei einem hypothetischen Ausfall von maximal zwei Wochen bereits für die meisten Verbindungen. Entsprechend lässt sich schließen, dass Kaskadeneffekte mit längerer Ausfalldauer des Quell-Teilsektors tendenziell eine immer höhere Beeinträchtigung im Ziel-Teilsektor hervorrufen.

Die zunehmende Bedeutsamkeit der Abhängigkeiten äußert sich zudem in der Dichte der Netzwerke. Die Knotengröße ist in allen fünf Netzwerken dieselbe wie in Abbildung 4 (Gesamtnetzwerk mit ungewichteten Kanten). Allerdings erscheinen diese mit zunehmender Ausfalldauer größer, weil das Netzwerk dichter und die Darstellung dadurch herangezogen angezeigt wird. Da sich die Gewichtung der Kanten

Veränderung des KRITIS-Gesamtsystems bei unterschiedlichen Ausfalldauern



Quelle: eigene Darstellung



Quelle: eigene Darstellung

auf die Knotenpositionierung auswirkt, rücken diese näher zusammen und auch Teilsektoren mit wenigen Abhängigkeiten werden immer stärker an das Zentrum des Gesamtnetzwerks herangezogen.

### Systemisches Kaskadenpotenzial von KRITIS-Teilsektoren

Die qualitativen und quantitativen Erkenntnisse, die sich für die beiden Faktoren aus den Netzwerkanalysen ergeben, ermöglichen ein tiefergehendes Verständnis des KRITIS-Gesamtsystems. Um die Teilsektoren hinsichtlich ihres systemischen Kaskadenpotenzials besser vergleichen zu können, braucht es eine Quantifizierung der Erkenntnisse und eine Verrechnung gemäß der eingangs aufgestellten Berechnungsvorschrift (siehe Abb. 1).

Für Faktor 1, die **Bedeutsamkeit der Teilsektoren**, fällt eine Quantifizierung leicht, da sich der Vernetzungsgrad der Teilsektoren über die Summe der ein- und ausgehenden Abhängigkeiten ermitteln lässt. Die Nähezentralität, also die durchschnittliche, normierte Pfaddistanz eines jeden Teilsektors, lässt sich in Gephi berechnen und ausgeben. Gemäß der Berechnungsvorschrift lässt sich somit in Abbildung 8 der Faktor 1 als Produkt aus Vernetzungsgrad und Nähezentralität für jeden Teilsektor berechnen.

Für Faktor 2, die **Bedeutsamkeit der Abhängigkeiten**, wird gemäß Berechnungsvorschrift die Stärke des potenziellen Kaskadeneffekts mit einem Zeitfaktor gewichtet. Die Stärke wird quantifiziert, indem die durchschnittliche Schwere der Beeinträchtigungen, die potenziell von einem Teilsektor ausgehen, ermittelt wird. Als Zeitfaktor wird die Ausfalldauer zu-

## Berechnung des systemischen Kaskadenpotenzials von KRITIS-Teilsektoren

Teilsektor	Vernetzungsgrad	Nähezentralität	Faktor 1:	Stärke des	Zeitfaktor	Faktor 2:	Systemisches
			Bedeutsamkeit	potenziellen		Bedeutsamkeit	
Berechnungs-	Summe ein- &	Normierte	Vernetzungsgrad	Ø Schwere	Ausfalldauer	Ø Schwere	Faktor 1
grundlage	ausgehender	Pfaddistanz	x	der Beeinträch-	mit Ø schweren	x	x
	Dependenzen		Pfaddistanz	tigung	ausgehenden Be-	Zeitfaktor	Faktor 2
					einrächtigungen		
Elektrizität	102	0,97	98,94	3,84	x 16	61,38	6.073
Informationstechnik	83	0,97	80,51	3,76	x 16	60,13	4.841
Telekommunikation	82	0,97	79,54	3,63	x 16	58,14	4.624
Notfall-/Rettungswesen & Katastrophenschutz	66	0,67	44,22	3,38	x 16	54,02	2.389
Öffentliche Wasserversorgung	52	0,78	40,56	3,56	x 16	56,96	2.310
Logistik	80	0,74	59,2	3,16	x 8	25,25	1.495
Straßenverkehr	54	0,76	41,04	3,5	x 8	28	1.149
Medizinische Versorgung	76	0,55	41,8	3,33	x 8	26,66	1.114
Öffentliche Abwasserbeseitigung	51	0,67	34,17	3,38	x 8	27,02	923
Ernährungswirtschaft	64	0,51	32,64	3,16	x 8	25,25	824
Mineralöl	76	0,82	62,32	2,74	x 4	10,97	684
Labore	44	0,51	22,44	2,93	x 8	23,42	526
Finanzdienstleister	38	0,52	19,76	3,26	x 8	26,06	515
Regierung und Verwaltung	65	0,67	43,55	2,8	x 4	11,19	487
Börsen	33	0,56	18,48	3,2	x 8	25,6	473
Banken	50	0,68	34	2,85	x 4	11,41	388
Gas	42	0,76	31,92	2,93	x 4	11,74	375
Justizeinrichtungen	64	0,52	33,28	2,51	x 4	10,04	334
Lebensmittelhandel	56	0,51	28,56	2,89	x 4	11,58	331
Arzneimittel und Impfstoffe	60	0,53	31,8	2,57	x 4	10,3	328
Schieneverkehr	40	0,7	28	2,57	x 4	10,28	288
Rundfunk, Presse	23	0,5	11,5	2,86	x 8	22,88	263
Seeschifffahrt	38	0,6	22,8	2,37	x 4	9,47	216
Parlament	45	0,45	20,25	2,57	x 4	10,26	208
Luftfahrt	57	0,58	33,06	2,41	x 2	4,82	159
Symbolträchtige Bauwerke	20	0,31	6,2	2,8	x 8	22,4	139
Versicherungen	46	0,57	26,22	2,39	x 2	4,78	125
Kulturgut	33	0,25	8,25	2,6	x 4	10,4	86
Binnenschifffahrt	26	0,6	15,6	2,36	x 2	4,73	74

Quelle: eigene Darstellung

grunde gelegt, ab der im Mittel schwere Beeinträchtigungen in anderen Teilsektoren hervorgerufen werden. Diese wird als Zweierpotenz gewichtet, wobei das Gewicht umso größer wird, je geringer die Ausfalldauer ist. Gemäß der Berechnungsvorschrift lässt sich in Abbildung 8 somit der Faktor 2 als Produkt aus Stärke des potenziellen Kaskadeneffekts und Zeitfaktor für jeden Teilsektor berechnen.

Mit dem Produkt aus Faktor 1 und Faktor 2 lassen sich die KRITIS-Teilsektoren hinsichtlich ihres systemischen Kaskadenpotenzials vergleichen. Abbildung 8 präsentiert das Ergebnis als absteigend sortierte Reihung der Teilsektoren.

Das systemische Kaskadenpotenzial weist eine deutliche Spannbreite zwischen den KRITIS-Teilsektoren auf. Unter der gewählten Berechnungsvorschrift liegt das systemische Kaskadenpotenzial des erstplatzierten Teilsektors Elektrizität bei mehr als dem Achtzigfachen des letztplatzierten Teilsektors Binnenschifffahrt. Die gesamtsystemischen Auswirkungen eines Kaskadeneffekts, der vom Teilsektor Elektrizität ausginge, wären hinsichtlich der Ausbreitungs- und Vielfältigungspfade wie auch der Stärke demnach deutlich gravierender, als wenn der Kaskadeneffekt vom Teilsektor Binnenschifffahrt ausginge.

Es überrascht wenig, dass der Teilsektor Elektrizität das größte systemische Kaskadenpotenzial aufweist. Dennoch ist bemerkenswert, mit welchem Abstand dieser im Vergleich zu den zweit- und drittplatzierten Teilsektoren, Informationstechnik und Telekommunikation, abschneidet. Dieser Umstand ist nahezu ausschließlich auf den Vernetzungsgrad des Teilsektors zurückzuführen. Das Verhältnis der Teilsektoren Elektrizität, Informationstechnik und Telekommunikation

deutet sich bereits in der Netzwerkvisualisierung des Gesamtsystems (siehe Abb. 4) an: Obwohl alle drei dieselbe Nähezentralität aufweisen, hat die Elektrizität die größte Knotengröße und befindet sich zudem an der zentralsten Position des Netzwerks, und zwar – in konzentrischer Lesart – vor den Teilsektoren Informationstechnik und Telekommunikation.

Wie wichtig eine Berechnung des systemischen Kaskadenpotenzials ist, zeigen die Teilsektoren Ernährungswirtschaft und Luftverkehr. Im Netzwerkdiagramm zu Faktor 1 (siehe Abb. 4) sind beide an zentraler Stelle positioniert, wo sie auch in den verdichteten Netzwerkvisualisierungen zu Faktor 2 (siehe Abb. 6 und 7) verbleiben. Doch während die Ernährungswirtschaft im Gesamtranking des systemischen Kaskadenpotenzials Platz zehn einnimmt, weist die Luftfahrt das fünftgeringste systemische Kaskadenpotenzial auf. Der Grund hierfür ist der deutliche Unterschied der Teilsektoren hinsichtlich des Faktors 2, der Bedeutsamkeit der Abhängigkeiten. Gemittelt über alle Ausfalldauern ruft die Ernährungswirtschaft im Durchschnitt bei anderen Teilsektoren Beeinträchtigungen der Stärke 3,16 (schwere Beeinträchtigungen) hervor. Hinzu kommt, dass bereits bei einer Ausfalldauer der Ernährungswirtschaft von maximal vier Tagen im Mittel schwere Beeinträchtigungen in den von der Ernährungswirtschaft abhängigen Teilsektoren entstehen. Der Luftverkehr hingegen verursacht durchschnittlich Beeinträchtigungen von 2,41 (mittlere Beeinträchtigungen) und ruft erst bei einer Ausfalldauer von maximal sechs Wochen im Mittel schwere Beeinträchtigungen hervor. Entsprechend weniger bedeutsam sind dessen Abhängigkeiten, sodass der Teilsektor Luftfahrt ein deutlich geringeres systemisches Kaskadenpotenzial aufweist.

## Reflexion, weiterer Forschungsbedarf und Ausblick

Der in diesem Beitrag präsentierte Forschungsansatz ermöglicht es, eine dringend benötigte, systemische Perspektive auf das Zusammenwirken einzelner Subsysteme im KRITIS-Gesamtsystem in Deutschland einzunehmen. Dabei ist hinzunehmen, dass das zur Komplexitätsreduzierung benötigte hohe Maß an Abstraktheit ausschließt, zugleich skalierbare Aussagen für konkrete Infrastrukturanlagen in spezifischen Räumen abzuleiten (diesem spezifischen Ziel haben sich jedoch jüngst die Kolleginnen und Kollegen des KIRMin-Projekts erfolgreich gewidmet; siehe Beitrag Fekete et al. in diesem Heft). Auch ist gewiss, dass die geschilderte Vorgehensweise lediglich ein möglicher Ansatz ist und weder

Anspruch auf Exklusivität noch auf Vollständigkeit erhebt. Stattdessen muss sie in einem kontinuierlichen wissenschaftlichen und praktischen Diskurs weiterentwickelt werden.

Der gewählte Ansatz verdeutlicht jedoch, dass es zur Erfassung des komplexen KRITIS-Gesamtsystems notwendig ist, sowohl die Teilsektoren als auch ihre Abhängigkeiten gleichermaßen zu untersuchen. Die Untersuchungsebene der Teilsektoren vermag zwar deren funktionelle Position im Gesamtsystem und aufgrund des Vernetzungsgrades die Möglichkeit zur Weitergabe von Kaskadeneffekten zu bestimmen. Das Ausmaß der potenziellen Kaskadeneffekte jedoch,

also die Schwere der Beeinträchtigungen, die diese hervorgerufen vermögen, ergibt sich erst aus der Betrachtung der Abhängigkeiten. Nur zusammengefasst lässt sich eine systemische Perspektive auf KRITIS einnehmen, denn „[...] komplexe Systeme verhalten sich nun einmal anders als die Summe ihrer Teile“ (Vester 2015: 25).

In der Dissertation werden die bereits angeführten Erhebungsdaten weiter ausgewertet und problemorientiert aufbereitet. Die Ergebnisinterpretation ist beispielsweise keinesfalls abgeschlossen. Insbesondere hinsichtlich der durchschnittlichen und einzelnen Stärken potenzieller Kaskadeneffekte ist eine Plausibilisierung anzustreben und der Einfluss bestehender Back-up-Systeme auf die Ergebnisse nachzuzeichnen. Zudem soll ein Konfidenz-Faktor den bisherigen Forschungsansatz erweitern. Demzufolge fließen künftig nur solche Abhängigkeiten in die Netzwerkvisualisierung ein, die mindestens die Hälfte der befragten Expertinnen und Experten mitträgt. Darüber hinaus liegt ein Fokus auf etwaigen Differenzen zwischen (vom Quell-Teilsektor angenommenen) ausgehenden Abhängigkeiten und (von den

Ziel-Teilsektoren ausgesagten) eingehenden Abhängigkeiten. Bisherigen Untersuchungen zufolge ist das Bewusstsein über ausgehende Abhängigkeiten nämlich oftmals geringer ausgeprägt als das über eingehende Abhängigkeiten (vgl. Klaver/Luijff/Nieuwenhuijs 2011: 33). In einem Ereignisfall können sich so die Beeinträchtigungen aufgrund eines mangelnden Informationsflusses zwischen den Akteurinnen und Akteuren der Teilsektoren verstärken.

Die Validität und Übertragbarkeit des hier präsentierten Forschungsansatzes wird künftig ebenfalls überprüft. Hierzu werden einzelne Teilsektoren und ihre ein- und ausgehenden Abhängigkeiten aus den Netzwerkdiagrammen extrahiert, in einem anwendungsorientierten Umfeld weiterentwickelt und mit dem hier präsentierten komplexitätsreduzierten, abstrakt-generischen Forschungsansatz verglichen. Denn am wichtigsten ist, das Wissen über systemische Kaskadeneffekte in die raumordnerische Praxis zu integrieren, sodass diese ihrer Verpflichtung, dem „Schutz kritischer Infrastrukturen [...] Rechnung zu tragen“ (§ 2 Abs. 2 Nr. 3 Satz 4 ROG), nachkommen kann.

# Literatur

- BBK** – Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe (Hrsg.), 2017: Schutz Kritischer Infrastrukturen – Identifizierung in sieben Schritten. Arbeitshilfe für die Anwendung im Bevölkerungsschutz. Praxis im Bevölkerungsschutz, Bd. 20. Bonn.
- BMI** – Bundesministerium des Inneren (Hrsg.), 2009: Nationale Strategie zum Schutz Kritischer Infrastrukturen (KRITIS-Strategie). Zugriff: <https://www.bmi.bund.de>, [abgerufen am 31.07.2019].
- Bouchon**, Sara, 2006: The Vulnerability of Interdependent Critical Infrastructures Systems. Epistemological and Conceptual State-of-the-Art. Ispra, Italy.
- BSI/BBK** – Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik; Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe, 2019: Sektoren und Branchen Kritischer Infrastrukturen. Zugriff: <https://www.kritis.bund.de>, Einführung, Sektorenübersicht [abgerufen am 31.07.2019].
- Di Mauro**, Carmelo; Bouchon, Sara; Logtmeijer, Christiaan; Pride, Russ D.; Hartung, Thomas; Nordvik, Jean-Pierre, 2010: A structured approach to identifying European critical infrastructures. *International Journal of Critical Infrastructures* 6 (3): 277–292.
- Dudenhofer**, Donald D.; Permann, May R.; Manic, Milos, 2006: CIMS: A framework for infrastructure interdependency modeling and analysis. In: L. F. Perrone, F. P. Wieland, J. Liu, B. G. Lawson, D. M. Nicol und R. M. Fujimoto (Hrsg.): *Proceedings of the 2006 Winter Simulation Conference*.
- Eusgeld**, Irene; Nan, Cen; Dietz, Sven, 2011: "System-of-systems" approach for interdependent critical infrastructures. *Reliability Engineering & System Safety* 96 (6): 679–686.
- Fekete**, Alexander, 2018: Urban Disaster Resilience and Critical Infrastructure. Habilitationsschrift. Würzburg: Universität Würzburg.
- Jacomy**, Mathieu; Venturini, Tommaso; Heymann, Sebastien; Bastian, Mathieu, 2014: ForceAtlas2, a continuous graph layout algorithm for handy network visualization designed for the Gephi software. *PloS one* 9 (6), e98679.
- Katina**, Polinapilinho F.; Hester, Patrick T., 2013: Systemic determination of infrastructure criticality. *International Journal of Critical Infrastructures* 9 (3): 211–225.
- Katina**, Polinapilinho F.; Keating, Charles B., 2015: Critical infrastructures: a perspective from systems of systems. *International Journal of Critical Infrastructures* 11 (4): 316–344.
- Katina**, Polinapilinho F.; Pinto, Ariel C.; Bradley, Joseph M.; Hester, Patrick T., 2014: Interdependency-induced risk with applications to healthcare. *International Journal of Critical Infrastructure Protection* 7 (1): 12–26.
- Klaver**, Marieke; Luijff, Eric; Nieuwenhuijs, Albert (Hrsg.), 2011: Good Practices Manual for CIP Policies – for policy makers in Europe. RECIPE project, TNO. Zugriff: [http://www.oaip.ac.at/fileadmin/Unterlagen/Dateien/Publikationen/FINAL\\_RECIPEmanual.pdf](http://www.oaip.ac.at/fileadmin/Unterlagen/Dateien/Publikationen/FINAL_RECIPEmanual.pdf) [abgerufen am 31.07.2019].
- Laugé**, Ana; Hernantes, Josune; Sarriegi, Jose M., 2015: Critical infrastructure dependencies. A holistic, dynamic and quantitative approach. *International Journal of Critical Infrastructure Protection* 8: 16–23.
- Rinaldi**, Steven M.; Peerenboom, James P.; Kelly, Terrence K., 2001: Identifying, understanding, and analyzing critical infrastructure interdependencies. *IEEE Control Syst. Mag.* 21 (6): 11–25.
- Vester**, Frederic, 2015: Die Kunst vernetzt zu denken. Ideen und Werkzeuge für einen neuen Umgang mit Komplexität. Der neue Bericht an den Club of Rome. 10. Aufl. München: Dt. Taschenbuch-Verl. (dtv Wissen, 33077).

## Rechtsquellenverzeichnis

- Raumordnungsgesetz (ROG)** vom 22. Dezember 2008 (BGBl. I S. 2986), das zuletzt durch Artikel 2 Absatz 15 des Gesetzes vom 20. Juli 2017 (BGBl. I S. 2808) geändert worden ist.